

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Tanpa listrik infrastruktur masyarakat sekarang tidak akan menyenangkan. Makin bertambahnya konsumsi listrik per kapita di seluruh dunia menunjukkan kenaikan standar kehidupan manusia. Pemanfaatan secara optimum bentuk energi ini oleh masyarakat dapat dibantu dengan sistem distribusi yang efektif (Pabla, 1981: 3).

Suatu sistem energi listrik mengandung empat unsur. Pertama, adanya unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya adalah tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT) atau tegangan ekstra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atas utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakaian besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1 menggambarkan skema suatu sistem energi listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem terinterkoneksi (Kadir, 2006: 3).

Energi listrik dibangkitkan pada pembangkit tenaga listrik (PTL), yang dapat merupakan suatu pusat listrik tenaga uap (PLTU), pusat tenaga listrik air (PLTA), pusat listrik tenaga gas (PLTG), pusat listrik tenaga diesel (PLTD), ataupun pusat listrik tenaga nuklir (PLTN). Jenis PTL yang dipakai, pada umumnya tergantung dari jenis bahan bakar atau energi primer yang tersedia. Pada sistem besar sering ditemukan beberapa jenis PTL. Perlu pula dikemukakan bahwa PLTD biasanya dipakai pada sistem yang lebih kecil. PTL biasanya membangkitkan energi listrik pada tegangan menengah (TM), yaitu pada umumnya antara 6 dan 20 kV.

Pada sistem tenaga listrik yang besar, atau bilamana PTL terletak jauh dari pemakai, maka energi listrik itu perlu diangkut melalui saluran transmisi, dan tegangannya harus dinaikkan dari TM menjadi tegangan tinggi (TT). Pada jarak yang sangat jauh malah digunakan tegangan ekstra tinggi (TET). Menaikkan tegangan itu

pemakai. Di Indonesia, tegangan rendah adalah 220/380 volt, dan merupakan sistem distribusi sekunder. Pada tiang-tiang TR terpasang pula lampu-lampu penerangan jalan umum.

Energi diterima pemakai dari tiang TR melalui konduktor atau kawat yang dinamakan sambungan rumah (SR), dan berakhir pada alat pengukur listrik yang sekaligus merupakan titik akhir pemilikan PLN. Setelah titik ini, berawal unsur utilitas pada instalasi pemakai tenaga listrik (Kadir, 2006: 7).

2.2 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan menjadi 5. Namun pada tugas akhir ini hanya dicantumkan 4 klasifikasi. Adapun klasifikasi yang digunakan adalah sebagai berikut (Suhadi, 2008: 14):

- 1) Menurut Nilai Tegangannya.
- 2) Menurut Bentuk Tegangannya.
- 3) Menurut Jenis/Tipe Konduktornya.
- 4) Menurut Susunan Rangkaian.

2.2.1 Menurut Nilai Tegangannya

Berdasarkan tegangan pengenalnya sistem jaringan distribusi dibedakan menjadi dua macam, yaitu (Suhadi, 2008: 14):

- 1) Saluran distribusi Primer. Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik *Sekunder Trafo Substation* (G.I.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20kV. Jaringan listrik 70 kV atau 150 kV, jika langsung melayani pelanggan, bisa disebut jaringan distribusi.

Berdasarkan SPLN No. 72 1987 pengaturan tegangan dan turun tegangan pada JTM, tegangan pada JTM diperbolehkan:

- a) 2% dari tegangan kerja sebagaimana tercantum pada ayat 22 bagi sistem yang tidak memanfaatkan (STB) yaitu sistem spindel dan gugus. STB merupakan singkatan dari (Sadapan Tanpa beban).
 - b) 5% dari tegangan kerja bagi sistem yang memanfaatkan STB yaitu sistem radial di atas tanah dan sistem simpul.
- 2) Saluran distribusi Sekunder. Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban. Salurannya

bisa berupa SKTM atau SUTM yang menghubungkan Gardu Distribusi/sisi sekunder trafo distribusi ke konsumen. Tegangan sistem yang digunakan adalah 220 Volt dan 380 Volt.

Berdasarkan SPLN No. 72 1987 pengaturan tegangan dan turun tegangan pada JTR, tegangan pada JTR diperbolehkan:

- a) Turun tegangan pada STR (Saluran Tegangan Rendah) dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
- b) Turun tegangan pada SR (Sambungan Rumah) dibolehkan 1% dari tegangan nominal.

2.2.2 Menurut Bentuk Tegangannya

- a) Saluran Distribusi DC (*Direct Current*) menggunakan sistem tegangan searah.
- b) Saluran Distribusi AC (*Alternating Current*) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

2.2.3 Menurut Jenis/Tipe Konduktornya

- a) Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan *support* (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas (Suhadi, 2008: 14):
 1. Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
 2. Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
- b) Saluran Bawah Tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (*ground cable*).
- c) Saluran Bawah Laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (*submarine cable*).

2.2.4 Menurut Susunan Rangkaian

Sistem jaringan distribusi berdasarkan bentuk jaringannya terdapat dua bagian yaitu distribusi primer, yang mempergunakan tegangan menengah, dan distribusi sekunder, yang mempergunakan tegangan rendah (Kadir, 2006: 21).

2.2.4.1 Jaringan Distribusi Primer

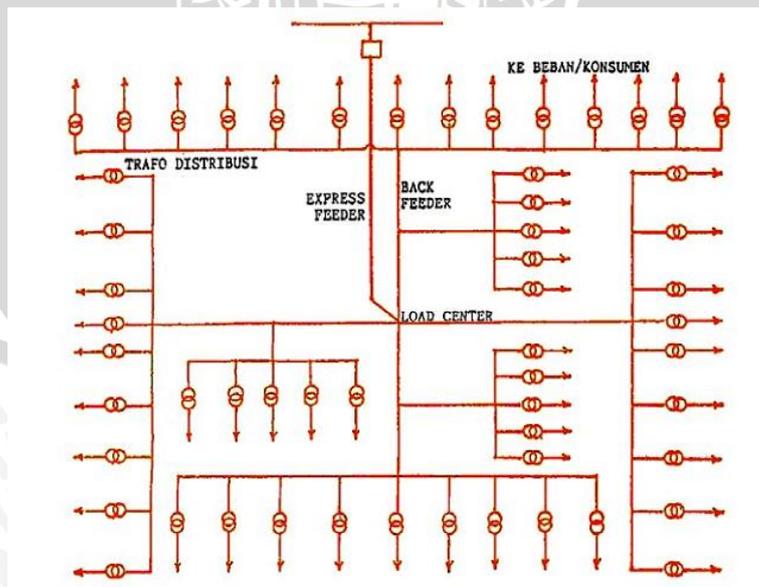
Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan disuplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer (Suhadi, 2008: 17).

a) Jaringan Distribusi Radial

Bila antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (*line*), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi, antara lain (Suhadi, 2008: 18):

- (1). Radial tipe pohon.
- (2). Radial dengan *tie* dan *switch* pemisah.
- (3). Radial dengan pusat beban.
- (4). Radial dengan pembagian *phase area*.



Gambar 2.2 Jaringan radial tipe pusat beban
Sumber: Suhadi (2008:17)

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2, Bentuk ini mencatu daya dengan menggunakan penyulang utama (*main feeder*) yang disebut "*express feeder*" langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini disebar dengan menggunakan "*back feeder*" secara radial.

b) Jaringan Distribusi Ring (*Loop*)

Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Seperti yang terlihat pada gambar 2.3 jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan "*loop*". Susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil (Suhadi, 2008: 20).

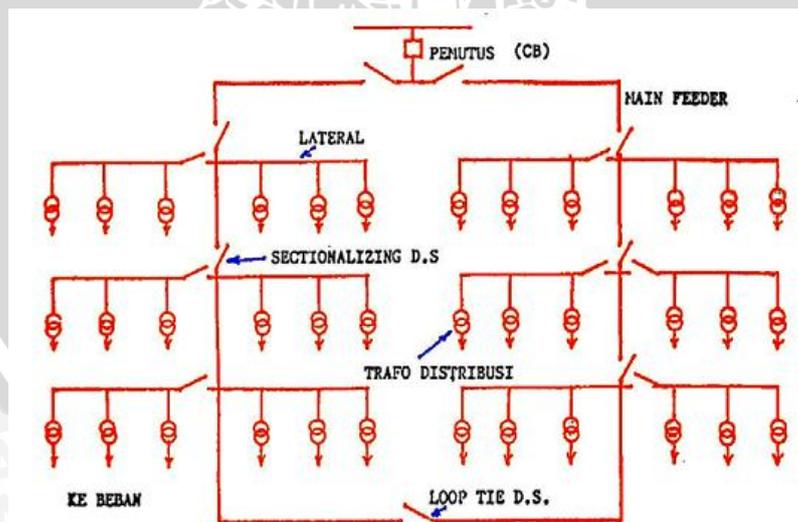
Bentuk *loop* ini ada 2 macam, yaitu (Suhadi, 2008: 20):

1. Bentuk *open loop*.

Bila dilengkapi dengan *normally-open switch*, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

2. Bentuk *close loop*.

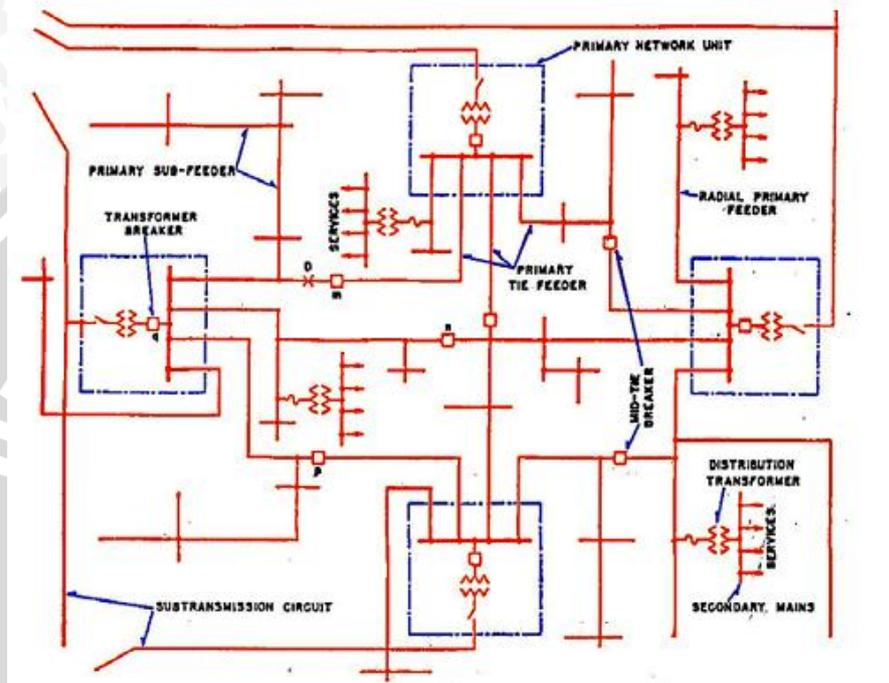
Bila dilengkapi dengan *normally-close switch*, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.



Gambar 2.3 Jaringan distribusi tipe ring
Sumber: Suhadi (2008:21)

c) Jaringan Distribusi Jaring-Jaring (NET)

Merupakan gabungan dari beberapa saluran *mesh*, dimana terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Seperti yang terlihat pada gambar 2.4 jaringan ini berbentuk jaring-jaring, kombinasi antara radial dan *loop* (Suhadi, 2008: 20).



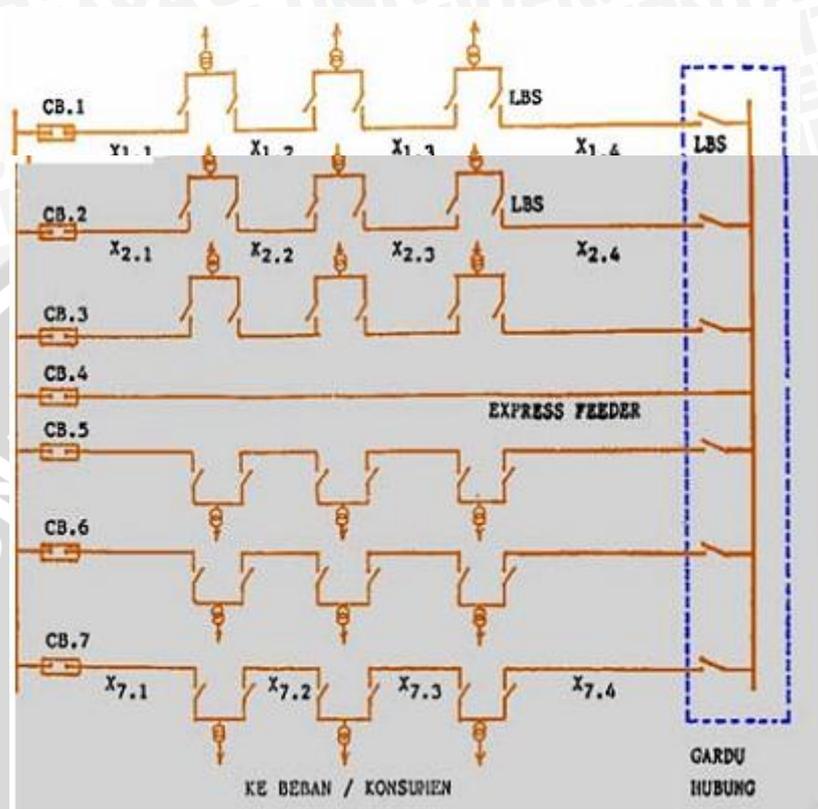
Gambar 2.4 Jaringan Distribusi NET dilengkapi *breaker* pada bagian tengah masing-masing penyulang
Sumber: Suhadi (2008:22)

d) Jaringan Distribusi Spindel

Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada, maka dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi, yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang populer adalah bentuk *spindle*, yang biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Seperti yang terlihat pada gambar 2.5. Saluran 6 penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "*working feeder*" atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "*express feeder*".

Fungsi "*express feeder*" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "*working feeder*", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi

normal. Dalam keadaan normal memang "*express feeder*" ini sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu diingat, bahwa bentuk-bentuk jaringan beserta modifikasinya seperti yang telah diuraikan di muka, terutama dikembangkan pada sistem jaringan arus bolak-balik (AC) (Suhadi, 2008: 24).



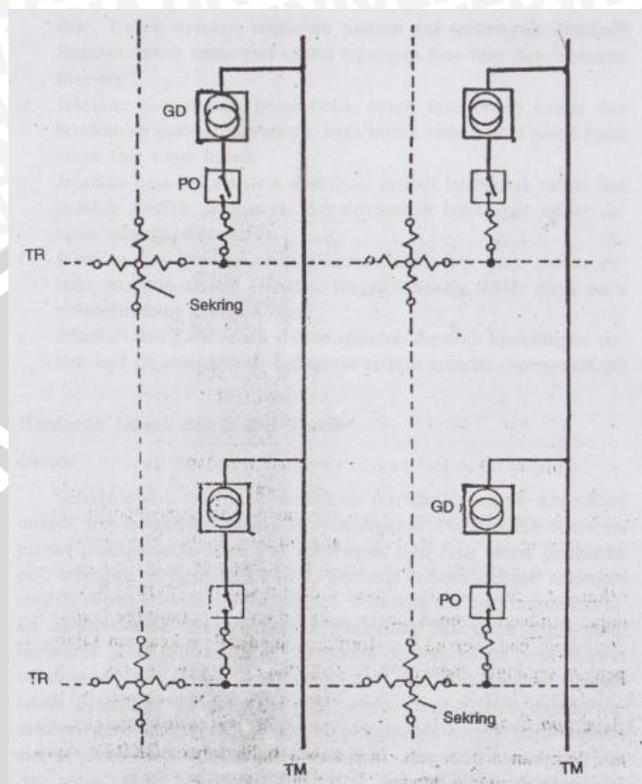
Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Spindel
Sumber: Suhadi (2008:24)

2.2.4.2 Jaringan Distribusi Sekunder

Sistem jaringan sekunder yang baik pada saat ini memberitahukan taraf keandalan pada jaringan tegangan rendah di daerah dengan kepadatan beban yang tinggi, sehingga biayanya yang tinggi dapat dipertanggungjawabkan dan tingkat keandalan ini dipandang diperlukan. Pada keadaan tertentu dapat terjadi bahwa satu pelanggan tunggal mendapat penyediaan energi listrik dengan sistem yang dikenal dengan *spot networks* (Kadir, 2006: 31).

Pada umumnya, jaringan sekunder terjadi dengan menghubungkan semua sisi tegangan rendah dari gardu-gardu transformator yang diisi oleh dua atau lebih *feeder* tegangan menengah. Pada sisi tegangan rendah gardu distribusi terdapat saklar daya yang dioperasikan secara otomatis dan dikenal dengan nama proteksi otomatis (PO). Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Proteksi ini akan melepas transformator dari

jaringan sekunder bilamana pengisian primer hilang tegangan. Hal ini akan menghindari suatu arus balik dari sisi tegangan rendah ke sisi tegangan menengah. Saklar daya didukung oleh sebuah sekring sehingga, bilamana proteksi otomatis gagal, sekring akan bekerja dan melepaskan transformator dari jaringan sekunder.



Gambar 2.6 Jaringan Sekunder Tegangan Rendah
Sumber: Kadir (2006:33)

2.3 Sistem Pengamanan Jaringan Distribusi 20 kV

Sistem pengaman bertujuan untuk mencegah atau membatasi kerusakan pada jaringan beserta peralatannya dan keselamatan umum yang disebabkan karena gangguan dan meningkatkan kelangsungan pelayanan pada konsumen.

Macam dan karakteristik beban sangat mempengaruhi perencanaan pengamanan dan macam dan karakteristik beban pulalah yang banyak menentukan perencanaan suatu sistem distribusi.

Untuk daerah pada beban di pusat perkotaan, jaringan yang dibutuhkan adalah kabel tanah dengan sistem tertutup dan dengan demikian layak untuk dipergunakan pengaman yang lebih tinggi tingkatnya dan lebih mahal, sebaliknya untuk daerah luar kota pada umumnya yang kepadatan penduduknya rendah. Jaringan yang diperlukan cukup saluran udara radial dengan pengaman yang lebih sederhana dan murah sesuai tingkat keandalan yang masih dapat diterima pemakainya (SPLN No. 52-3: 1983: 4).

Jadi perencanaan suatu sistem pengamanan pada hakekatnya tidak dapat dipisahkan, melainkan harus sudah terpadu (*integrated*) dalam perencanaan sistem distribusinya.

Pelaksanaan dari tugas pengamanan, bila kita perinci lebih lanjut adalah sebagai berikut (SPLN No. 52-3: 1983: 6):

- a) Melakukan koordinasi dengan sisi Tegangan Tinggi (G.I, Transmisi, dan Pembangkit).
- b) Mengamankan peralatan dari kerusakan karena arus lebih.
- c) Membatasi kemungkinan terjadi kecelakaan.
- d) Secepatnya membebaskan pemadaman karena gangguan.
- e) Membatasi daerah yang mengalami pemadaman.
- f) Mengurangi frekuensi pemutusan tetap karena gangguan.

2.3.1 Sistem Pengaman

- 1) Pemutus beban (PB) utama dipasang pada saluran utama di G.I sebagai pengaman utama jaringan dan dilengkapi dengan alat pengaman (relai) antara lain (SPLN No. 52-3: 1983: 8):
 - a) Relai penutup balik untuk memulihkan sistem dari gangguan-gangguan yang bersifat temporer dan untuk koordinasi kerja dengan peralatan pemutus atau pengaman lain di hilir dan saluran cabang dari jaringan antara lain Saklar Seksi Otomatis (SSO) dan Pemutus Lebur (PL).
 - b) Relai gangguan tanah untuk membebaskan gangguan fasa-tanah.
 - c) Relai arus lebih untuk membebaskan gangguan antar fasa.
- 2) Sakelar-seksi otomatis (SSO)

Sebagai alat pemutus rangkaian untuk dapat memisah misahkan saluran utama dalam beberapa seksi agar pada keadaan gangguan permanen luas daerah jaringan yang harus dibebaskan di sekitar lokasi gangguan sekecil mungkin SSO membuka pada saat rangkaian tidak ada tegangan tetapi dalam keadaan bertegangan harus mampu menutup rangkaian dalam keadaan hubung singkat. SSO ini dapat juga dipakai untuk membuka dan menutup rangkaian beban. Saklar ini bekerja atas dasar penginderaan tegangan (SPLN No. 52-3: 1983: 8).

SSO dilengkapi dengan alat pengatur dan trafo tegangan sebagai sumber tenaga penggerak dan pengindra.

3) Pelebur (PL)

PL dipasang pada titik percabangan antara saluran utama dan saluran cabang (*Trunk Line*). PL juga dipasang pada sisi Primer (20 kV) dari trafo distribusi. PL digunakan untuk mengamankan jaringan dan peralatan yang berada di sebelah hilirnya terhadap gangguan permanen antar fasa dan tidak mengamankan gangguan fasa-tanah (SPLN No. 52-3: 1983: 8).

4) *Load Break Switch (LBS)*

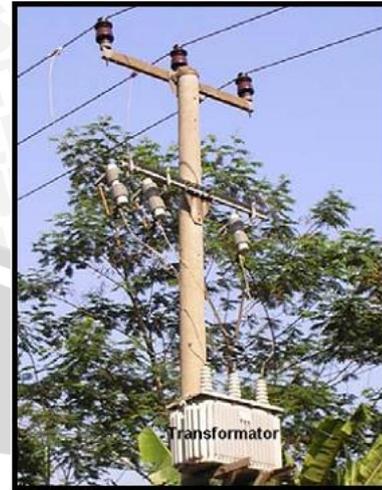
Swich pemutus beban *Load Break Switch (LBS)* merupakan saklar atau pemutus arus tiga fasa untuk penempatan di luar ruas pada tiang pancang, yang dikendalikan secara elektronik. *Switch* dengan penempatan di atas tiang pancang ini dioptimalkan melalui kontrol jarak jauh dan skema otomatisasi. Saklar pemutus beban juga merupakan sebuah sistem penginterupsi hampa yang terisolasi oleh gas SF₆ dalam sebuah tangki baja anti karat dan disegel. Sistem kabelnya yang *full-insulated* dan sistem pemasangan pada tiang pancang yang sederhana yang membuat proses instalasi lebih cepat dengan biaya yang rendah. Sistem pengendalian elektroniknya ditempatkan pada sebuah kotak pengendali yang terbuat dari baja anti karat sehingga dapat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan. Panel pengendali (*user-friendly*) dan tahan segala kondisi cuaca. Sistem monitoring dan pengendalian jarak jauh juga dapat ditambahkan tanpa perlu menambahkan *Remote Terminal Unit (RTU)* (Suhadi, 2008: 322).

2.4 Transformator

Transformator merupakan salah satu alat listrik yang banyak digunakan pada bidang tenaga listrik dan bidang elektronika. Pada bidang tenaga listrik, transformator digunakan mulai dari pusat pembangkit tenaga listrik sampai ke rumah-rumah. Sebelum di transmisikan tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit dinaikkan terlebih dahulu dengan menggunakan sebuah transformator daya *Step Up* (Gambar 2.7.a) dengan tujuan untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi saat listrik di transmisikan. Kemudian sebelum digunakan oleh konsumen tegangan akan diturunkan lagi secara bertahap dengan menggunakan transformator daya *Step Down* (Gambar 2.7.b), sesuai dengan peruntukannya seperti kawasan industri, komersial, atau perumahan (Sumardjati, 2008: 355).



(a)



(b)

Gambar 2.7 Trafo Daya *Step Up* (a) dan Trafo Daya *Step Down* (b)
Sumber: Sumardjati (2008:355).

2.5 Gangguan Sistem Distribusi

Gangguan pada sistem distribusi adalah terganggunya sistem energi listrik yang menyebabkan suplai energi listrik terputus. Gangguan pada jaringan distribusi lebih banyak terjadi pada saluran udara (SUTM) yang umumnya lebih rentan dibandingkan dengan saluran distribusi yang ditanam pada tanah (SKTM). Sumber gangguan pada jaringan distribusi dapat berasal dari dalam sistem maupun dari luar sistem distribusi.

Macam gangguan (*fault*) pada sistem distribusi diatas tanah (saluran udara) dapat dibagi atas dua kelompok (SPLN No. 52-3, 1983: 4):

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya.
2. Gangguan yang bersifat permanen dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Gangguan yang bersifat temporer jika tidak dapat hilang dengan segera baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman (*recloser* atau PBO). dapat berubah menjadi gangguan yang bersifat permanen dan menyebabkan pemutusan tetap.

Jumlah gangguan pada saluran udara jauh lebih banyak daripada saluran bawah tanah. 70% sampai 90% dari seluruh gangguan yang mengenai saluran udara tegangan menengah adalah bersifat temporer (SPLN No. 52-3, 1983: 4).

2.6 Sistem Keandalan

Dari sudut pandang keteknikan definisi sederhana keandalan adalah kemungkinan dari satu atau kumpulan benda yang bekerja dengan memuaskan pada keadaan tertentu dan periode waktu yang ditentukan (Pabla, 1981: 109).

2.7 Indeks Keandalan

Indeks keandalan didefinisikan sebagai suatu besaran untuk membandingkan penampilan sistem distribusi. Dua indeks keandalan yang paling sering digunakan dalam sistem distribusi adalah indeks frekuensi pemadaman rata-rata (f) dan indeks lama pemadaman rata-rata (d) (SPLN No. 59, 1985: 5).

1. Sistem Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

Sistem Average Interruption Frequency Index (SAIFI) menunjukkan seberapa sering pelanggan rata-rata mengalami gangguan berkelanjutan selama periode waktu yang telah ditetapkan (IEEE, 2012: 5).

Untuk mencari nilai SAIFI dapat digunakan persamaan: (Sumber: SPLN No. 59, 1985: 5).

$$f = \frac{\sum_{i=1}^m C_i}{N} \quad \text{Pemadaman/Tahun.} \quad 2-1$$

dimana: m = Jumlah pemadaman dalam 1 tahun.

C_i = Jumlah konsumen yang mengalami pemadaman.

N = Jumlah konsumen yang dilayani.

Indeks keandalan ini dapat juga dihitung dari angka keluar komponen yang menyebabkan pemadaman (SPLN No. 59, 1985: 5):

$$f = \sum_{i=1}^n C_i X_i \lambda_i \quad \text{Pemadaman/Tahun.} \quad 2-2$$

dimana: C_i = Jumlah konsumen per unit yang mengalami gangguan.

X_i = Panjang penyulang atau unit komponen.

λ_i = Angka keluaran komponen yang menyebabkan pemadaman.

n_i = banyaknya komponen yang menyebabkan pemadaman.

Indeks frekuensi pemadaman (f) sebagaimana tercantum pada SPLN No. 59 1985 tentang "Keandalan pada Sistem Distribusi 20 kV" diperoleh dari angka keluar komponen sistem distribusi seperti yang terlihat pada tabel 2.1 (SPLN No. 68, 1986: 7).

Mengacu pada ANSI/IEEE std 100-1977, Angka keluar ialah jumlah keluar per waktu kerja unit (*unit expore time*) per komponen (SPLN No. 68-1B, 1986: 2).

Tabel 2.1 Angka keluar komponen sistem distribusi (SPLN No. 59, 1985: 7)

Komponen	Angka Keluar
Saluran udara	0,2/km/tahun
Saluran bawah tanah	0,07/km/tahun
Pemutus tenaga	0,004/unit/tahun
Sakelar beban	0,003/unit/tahun
Sakelar pisah	0,003/unit/tahun
Penutup balik	0,005/unit/tahun
Penyambung kabel	0,001/unit/tahun
Trafo distribusi	0,005/unit/tahun
Pelindung jaringan	0,005/unit/tahun
Rel tegangan rendah sistem spot network	0,001/unit/tahun

Sumber: SPLN No. 59 (1985:7)

2. Sistem Average Interruption Duration Index (SAIDI)

Sistem Average Interruption Duration (SAIDI) menunjukkan total durasi gangguan bagi pelanggan rata-rata selama periode yang telah ditetapkan (waktu). Hal ini umumnya diukur dalam menit atau jam gangguan (IEEE, 2012: 5).

Untuk mencari nilai SAIDI dapat digunakan persamaan: (Sumber: SPLN No. 59, 1985: 5).

$$d = \frac{\sum_{i=1}^m C_i t_i}{N} \quad \text{Jam/Tahun} \quad 2-3$$

dimana: m = Jumlah pemadaman dalam 1 tahun.

t_i = Lamanya tiap-tiap pemadaman.

C_i = Jumlah konsumen yang mengalami pemadaman.

N = Jumlah konsumen yang dilayani.

Indeks keandalan ini dapat juga dihitung dari angka keluar komponen yang menyebabkan pemadaman dan waktu pemulihan pelayanan (SPLN No. 59, 1985: 6):

$$d = \sum_{i=1}^n X_i \lambda_i (\sum_{j=1}^m C_{ij} t_{ij}) \quad 2-4$$

dimana: C_{ij} = Jumlah konsumen per unit yang mengalami gangguan.

n_i = banyaknya komponen yang menyebabkan pemadaman.

X_i = Panjang penyulang atau unit komponen.

λ_i = Angka keluaran komponen yang menyebabkan pemadaman.

m_i = Jumlah dari fungsi kerja yang terlibat dalam pemulihan pelayanan.

t_{ij} = Waktu yang diperlukan dalam langkah demi langkah operasi kerja pemulihan pelayanan tercantum pada Tabel 2.2.



Tabel 2.2 Contoh waktu operasi kerja dan pemulihan pelayanan

Kode	Operasi Kerja	Waktu/Jam
A	Menerima panggilan dan waktu yang dibutuhkan untuk perjalanan ke GI	0,50
A	Menerima panggilan adanya pemadaman dan waktu yang dibutuhkan untuk perjalanan ke alat penutup kembali	1,00
B	Waktu yang dibutuhkan untuk sampai dari satu gardu ke gardu berikutnya	0,16
B	Waktu yang dibutuhkan untuk sampai dari satu gardu ke gardu berikutnya untuk sistem <i>spot network</i>	0,20
C	Waktu yang dibutuhkan untuk memeriksa indicator gangguan (hanya untuk sistem <i>spindle</i>)	0,83
D	Waktu yang dibutuhkan untuk membuka/menutup pemutus tenaga atau penutup kembali	0,25
E	Waktu yang dibutuhkan untuk membuka/menutup sakelar beban atau sakelar pisah	0,15
F	Waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kawat penghantar udara	3,00
G	Waktu yang dibutuhkan untuk mencari lokasi gangguan pada kabel bawah tanah	5,00
H	Waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kabel saluran bawah tanah	10,00
I	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti/memperbaiki pemutus tenaga, sakelar beban, penutup kembali atau saklar pisah	10,00
J	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti penyambung label (bulusan) untuk kabel yang berisolasi kertas	15,00
K	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti trafo distribusi	10,00
L	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti pelindung jaringan	10,00
M	Waktu yang dibutuhkan untuk mengganti/memperbaiki bus tegangan rendah	10,00

Sumber: SPLN No. 59 (1985:8)

3. Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)

CAIDI adalah indeks durasi gangguan konsumen rata-rata tiap tahun, menginformasikan tentang waktu rata-rata untuk penormalan kembali gangguan tiap-tiap pelanggan dalam satu tahun (IEEE, 2012: 5).

Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut: (Sumber: IEEE, 2012: 6).

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad 2-5$$

2.7.1 Tingkat Jaminan Pada Sistem Distribusi

Dalam menghitung indeks keandalan suatu sistem harus memiliki acuan indeks keandalan distribusi. Seperti yang terlihat pada tabel 2.3. Berikut adalah data standar keandalan distribusi yang sesuai dengan (SPLN No. 68-2, 1986: 13):

Tabel 2.3 Standar tingkat jaminan menurut konfigurasi jaringan pada sistem distribusi PLN Distribusi DKI & Tangerang

No	Tipe Jaringan	f (kali/tahun)	d (jam/tahun)
1	SUTM Radial	27,0	177,00
2	SUTM dengan PBO	11,0	58,00
3	SKTM Spindel tanpa PPDJ	1,7	6,25
4	SKTM Spindel dengan PPDJ	1,7	4,77
5	SKTM Gugus	1,7	5,00

Sumber: SPLN No. 68-2 (1986:13)

Dan PLN untuk distribusi lain dikalikan suatu faktor seperti yang terlihat pada tabel 2.4 sebagai berikut:

Tabel 2.4 Faktor pengali standar tingkat jaminan di luar daerah PLN distribusi DKI & Tangerang

No	Daerah	Faktor
1	Jawa & Bali	1,1
2	Sumatera	1,2
3	Kalimantan dan sulawesi	1,3
4	Maluku, NTB, dan NTT	1,4
5	Irian Jaya	1,5

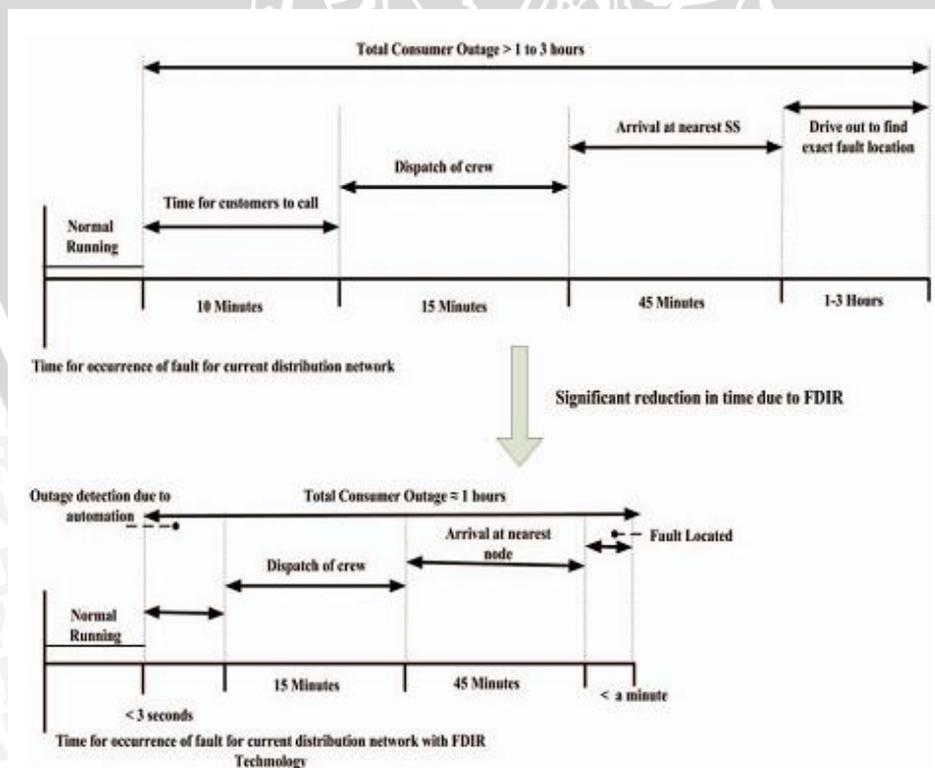
Catatan: Untuk wilayah desa dapat dikalikan dengan faktor yang lebih tinggi dari faktor untuk masing-masing wilayah di atas tetapi tidak melebihi 1,6.

Sumber: SPLN No. 68-2 (1986:14)

2.8 *Fault Detection, Isolation, and Restoration (FDIR)*

FDIR adalah Distribusi Otomasi Sistem yang dirancang untuk memulihkan pasokan ke pelanggan di waktu sesingkat mungkin. Sistem ini dirancang secara otomatis akan melakukan fungsi buka tutup CB pada saat terjadi gangguan dengan mendeteksi secara cepat adanya gangguan sehingga dapat mengisolasi dan mempercepat pemulihan gangguan.

Dalam kasus gangguan pada jaringan distribusi, tripnya proteksi dari penyulang yang ada di G.I (Gardu Induk) biasanya akan menyebabkan pemadaman pada seluruh trafo distribusi di jaringan penyulang tersebut, dan menyebabkan gangguan dalam pelayanan kepada banyak pelanggan, termasuk industri, rumah sakit, dan perumahan. Gambar. 2.8 menggambarkan skenario perbandingan waktu antara pengguna FDIR dan tanpa FDIR saat terjadi gangguan dan pemadaman. Hal ini dapat diamati dari gambar bahwa kerja FDIR sangat cepat (tidak lebih dari satu menit), total waktu pemadaman dapat dikurangi menjadi sekitar 3-4 jam setiap pemadaman. Dengan cara ini, FDIR dapat meningkatkan keandalan jaringan distribusi dan dengan cepat melakukan pemulihan daya ke pelanggan sebanyak mungkin (IEEE, 2013: 172).

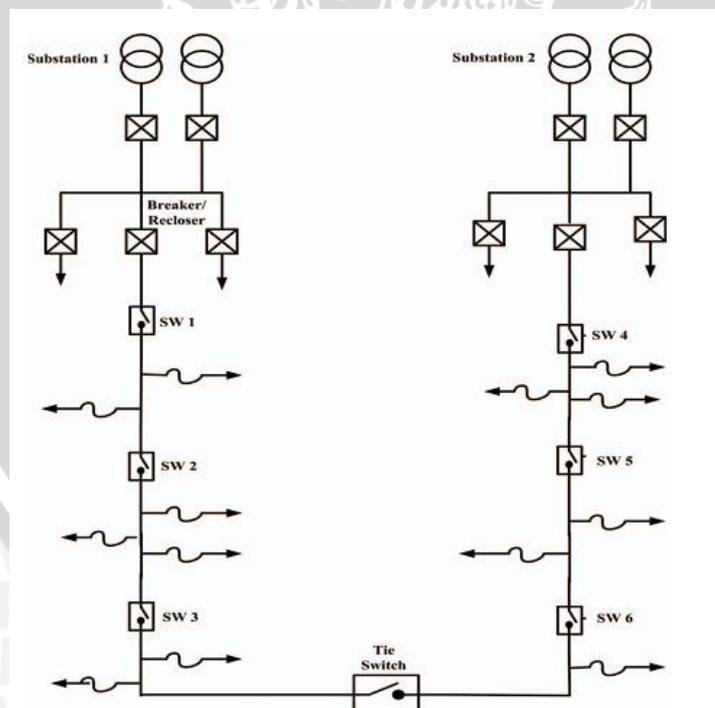


Gambar 2.8 Contoh perbandingan waktu penggunaan sistem FDIR
Sumber: IEEE (2013:172).

Sesuai pedoman standar, banyak utilitas distribusi diukur berdasarkan indeks keandalan pasokan listrik untuk mengukur secara kualitatif seberapa baik sistem tersebut mampu melayani pelanggan, dan dapat dikenakan sanksi peraturan apabila kinerja dari sistem tersebut tidak baik sebagaimana mestinya. Ada beberapa indeks pengukuran yang berbeda yang digunakan untuk mengukur efektivitas keandalan utilitas seperti: SAIDI (*Sistem Average Interruption Duration Index*) mengukur jumlah rata-rata per jam seberapa sering pelanggan mengalami gangguan; SAIFI (*Sistem Average Interruption Frequency Index*) menunjukkan rata-rata jumlah gangguan yang dialami pelanggan; CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*) menghitung durasi pemadaman rata-rata yang dialami pelanggan.

2.8.1 Skema Kerja dari FDIR

Gambar 2.9 menunjukkan sistem jaringan distribusi dengan konfigurasi loop dimana penyulang dari dua gardu induk dapat dihubungkan melalui *tie switch normally open* (NO). Setiap gardu berisi breaker/recloser yang dikendalikan oleh proteksi *Intelligent Electrical Device* (IED) (mengoperasikan *breaker/recloser* dalam kasus gangguan pada penyulang) (IEEE, 2013: 173).



Gambar 2.9 Sistem jaringan distribusi *Loop* dengan menggunakan switch/saklar.
Sumber: IEEE (2013:173).

Beberapa *switch/recloser* dipasang pada setiap penyulang. *Switch/recloser* ini juga dilengkapi dengan kontrol lokal yang memiliki kemampuan komunikasi. Pesan/Informasi di antara pengendali *recloser* di FDIR dapat mengirim informasi melalui kecepatan tinggi, komunikasi *peer-to-peer* IEC 61850 *GOOSE*. FDIR diaplikasikan disetiap pengontrolan *switch/recloser*, dan tidak mengontrol secara satu persatu namun secara menyeluruh sebagai *Master*.

2.8.2 Proses FDIR

Berikut ini adalah berbagai langkah sistem FDIR (IEEE, 2013: 173):

- 1) *Fault Detection*: mendeteksi gangguan adalah langkah pertama untuk FDIR yang dipicu oleh perangkat proteksi gardu (*Intelligent Electronic Device*, IED atau *recloser controller*). Setelah proteksi penyulang trip dan *lockout*, daerah gangguan yang menyebabkan proteksi tersebut trip akan terdeteksi. Daerah gangguan dari penyulang tersebut terdapat pada *section* yang berada di antara dua *switch/recloser*.
- 2) *Fault Isolation*: Setelah mengidentifikasi daerah gangguan, kedua sisi dari bagian gangguan tersebut diisolasi menggunakan pengontrolan *switch/reclosers*.
- 3) *Capability Estimation*: Setelah daerah gangguan terisolasi dan sebelum pemulihan, estimasi kemampuan perlu dilakukan untuk menentukan dan memastikan apakah pemulihan dari penyulang lain dalam keadaan yang baik dan memungkinkan.
- 4) *Restoration*: Dari estimasi kemampuan itu ditentukan apakah semua beban atau sebagian dari penyulang yang mengalami gangguan bisa dimanuver ke penyulang lain yang ber kondisi baik. Dengan demikian, proses *restoration* menutup *tie-switch* dan *switch* yang sama (yang dapat memberi *supply* listrik pada daerah yang tidak mengalami gangguan) sehingga beban-beban yang tidak seharusnya mati saat terjadi gangguan bisa mendapat *supply* listrik kembali.